

06;12

## Исследование шумов $p^+$ - $n$ -детекторов жестких излучений техникой амплитудного анализа

© А.М. Иванов, Н.Б. Строкан

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 1 декабря 1998 г.)

На примере кремниевых  $p^+$ - $n$ -детекторов ионов показаны возможности изучения шума техникой амплитудного анализа. Предлагается использовать в качестве параметра ток детектора и варьировать его подсветкой образца. По дробовому шуму фототока проводится также калибровка установки. Критериями дробового характера шума служат линейный ход квадрата шума от тока и значение наклона данной зависимости. Показано, что стандартная для амплитудного анализа аппаратура позволяет проводить точное и одновременно экспрессное исследование шума. Для излученных детекторов установлено отсутствие фликер-шума даже при увеличении на порядок величины заряда, встроеного в защитный окисел.

### Введение

Для измерения шума приборов общепринятой является техника селективного усиления (см., например, [1]). С ее помощью снимается непосредственно спектральная плотность шума. В настоящей работе применительно к детекторам излучений предлагается иная методика. Показано, что характер шумов можно установить, используя стандартную для наблюдения амплитудных спектров аппаратуру. Последняя включает три основных блока: зарядочувствительный предусилитель, усилитель-формирователь полосы пропускания и анализатор спектра амплитуд сигнала. В усилителе используются  $RC$ -фильтры дифференцирования-интегрирования, в результате чего пропускается относительно широкая полоса частот.

### Методика измерений и образцы

Анализ шумов на выходе указанной системы был проведен еще в 50-х годах для случая однократного  $RC$ -формирования сигнала [2]. В дальнейшем приводились результаты для более сложных фильтров, включающих  $n$ -кратное интегрирование. Так, для  $n = 2$  формула для шума, выраженного в единицах заряда, имеет вид [3]

$$\bar{q}_n^2 = (1/4)\{(\lambda/\lambda + 1)^2 [2kT(0.66/g_m)(C^2/T_{\text{int}}) + (1 + 2\lambda)(eI + 2kT/R)T_{\text{int}}] + C^2\bar{V}_f^2\}. \quad (1)$$

Здесь  $e$ -заряд электрона,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура, остальные обозначения относятся к элементам электрической цепи,  $C$  — суммарная емкость на входе,  $I$  — сумма токов исследуемого приемника и затвора полевого транзистора с крутизной  $g_m$ ,  $R$  — сопротивление нагрузки,  $\lambda$  — отношение постоянных  $RC$ -дифференцирования и интегрирования (соответственно  $T_{\text{dif}}$  и  $T_{\text{int}}$ ),  $V_f$  — напряжение фликер-шума. Показательно, что при формировании полосы пропускания  $RC$ -цепочками вклады различных источников

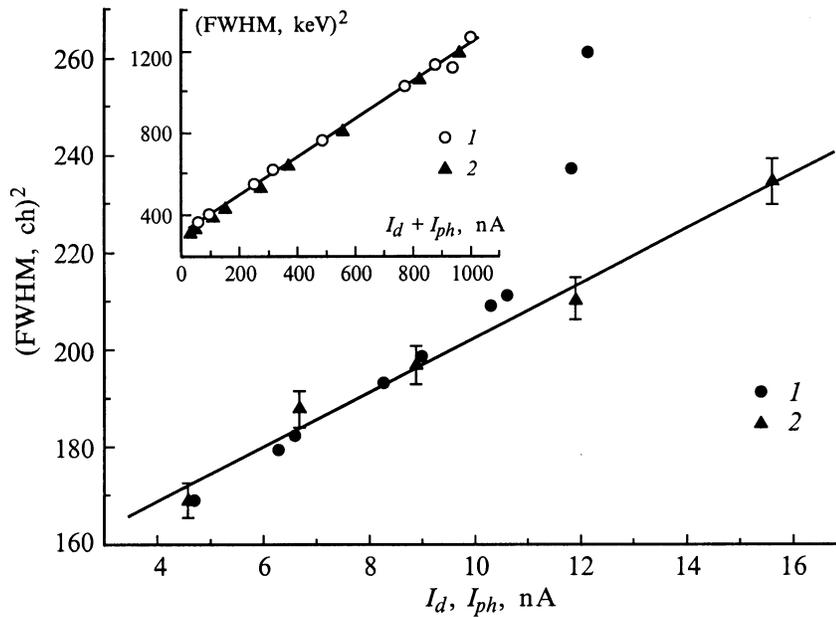
шума четко разделяются. Дробовой шум тока исток-сток полевого транзистора оказывается пропорциональным  $C^2/T_{\text{int}}$ . Шумы во входной цепи, связанные с протеканием тока  $I$  и тепловым шумом сопротивления нагрузки, напротив, пропорциональны  $T_{\text{int}}$ . Наконец, фликер-шум не зависит от времени интегрирования. Указанная структура формулы позволяет сопоставить шумы различных по своей природе источников.

Применительно к условиям эксперимента формула (1) заметно упрощается. Во-первых, параметрами  $p^+$ - $n$ -детектора являются его емкость и ток обратной ветви вольт-амперной характеристики. Указанные величины, как правило, и определяют значения  $C$  и  $I$  входной цепи. Сопротивление  $R$  выбирается достаточно большим, чтобы вклад его шума был пренебрежимо мал. Величина  $\lambda$  близка к единице. Далее, для более полного переноса неравновесного заряда в рабочей зоне детектора необходимо создать сильное электрическое поле. Высокое напряжение одновременно снижает значение емкости детектора, что положительно сказывается на уровне шума. В итоге на практике основным вопросом является величина максимально допустимого напряжения, не вызывающего избыточного шума. Последний может проявиться в поведении второго слагаемого формулы (1), связанного с током во входной цепи  $I$ , а также в добавлении фликер-шума. Структура формулы позволяет использовать в качестве критерия отсутствия избыточного шума величину производной  $d\bar{q}_n^2/dI$ . Ее величины с учетом отмеченных выше упрощений имеет вид, где  $d\bar{V}_f^2/dI$  явно не определена

$$d\bar{q}_n^2/dI = (3/16)eT_{\text{int}} + C^2/4(d\bar{V}_f^2/dI). \quad (2)$$

В единицах энергии это означает, что при отсутствии фликер-шума (либо малости  $d\bar{V}_f^2/dI$ ) производная  $d\bar{q}_n^2/dI$  составляет  $1.16(\text{keV})^2/\text{nA}$  при  $T_{\text{int}} = 1 \mu\text{s}$ .

Фоточувствительность детекторов дает методическую возможность вариации шумов тока путем подсветки



**Рис. 1.** Зависимость шума от протекающего через детектор *N1* тока. Вариация тока путем возрастания напряжения (50–225 В) (*1*) и подсветки при 50 В (*2*). На вставке — зависимость шума от фототока при отсутствии избыточных шумов. Напряжение, В: *1* — 50, *2* — 190.

образца. Дополнительная роль подсветки — калибровка установки заведомо дробовым шумом фототока.

Измерения, поясняющие сказанное, были поставлены на Si-детекторах ускоренных ионов. Характеристики детекторов подробно описаны ранее [4,5]. Укажем, что образцы представляли собой  $p^+-n$ -переходы и были получены в режиме "мелкой" диффузии бора в высокоомный  $n$ -Si. Контакт к  $p^+$ -слою выполнялся в варианте "расширенного электрода".

Детекторы вместе со стандартным светодиодом (использовался для калибровочного фототока) помещались в экранированную камеру, которая подключалась ко входу предусилителя. Одновременно через емкость  $\approx 1$  pF на вход подавались импульсы от генератора стабильной амплитуды. Амплитуда импульсов размывалась шумами, и результирующий спектр наблюдался на амплитудном анализаторе. Измерялась ширина спектра на уровне 0.5 от максимума (*FWHM*), равная  $2.35\sqrt{q\mu}$ . При частоте следования импульсов  $10^4$ – $10^5$  Hz обеспечивалась необходимая точность отсчета при времени набора спектра  $\approx$  минуты. Цена канала анализатора в единицах энергии определялась калибровкой по семи линиям альфа-распада препарата  $^{228}\text{Th}$ .

## Результаты измерения шума

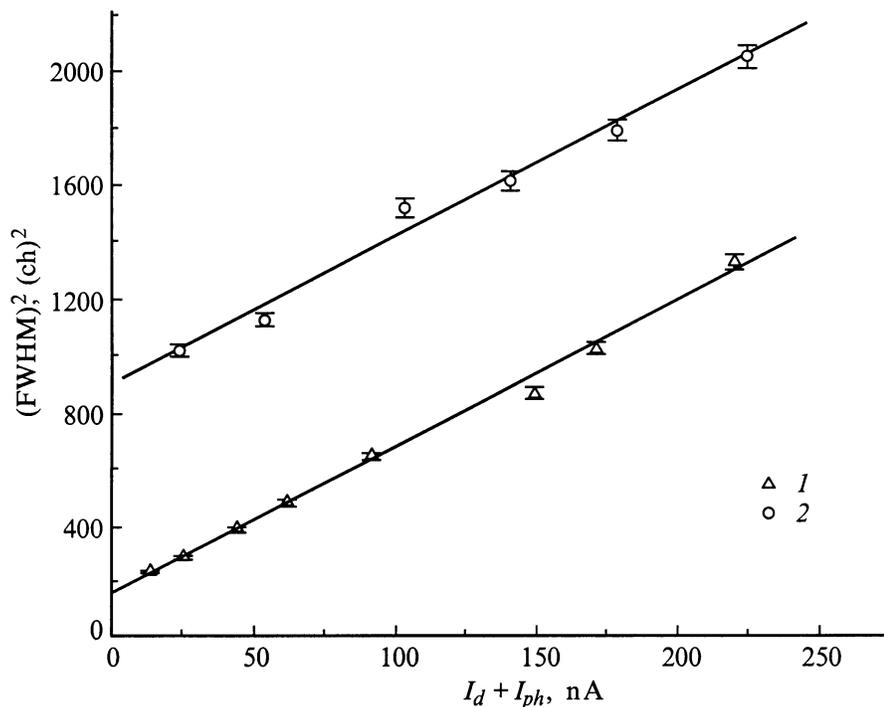
На рис. 1 в функции тока сопоставлены шумы детектора в двух режимах. Точки кривой *1* получены при последовательном увеличении напряжения смещения в диапазоне 50–225 В. Для зависимости *2* (аппроксимиро-

вана прямой) напряжение было неизменно и составляло  $U = 50$  В, а ток варьировался за счет подсветки детектора излучением светодиода. Заметим, что выбор значения постоянной формирования  $T_{\text{int}} = 3 \mu\text{s}$ , а также малая емкость детектора позволили сделать вклад шума тока определяющим.

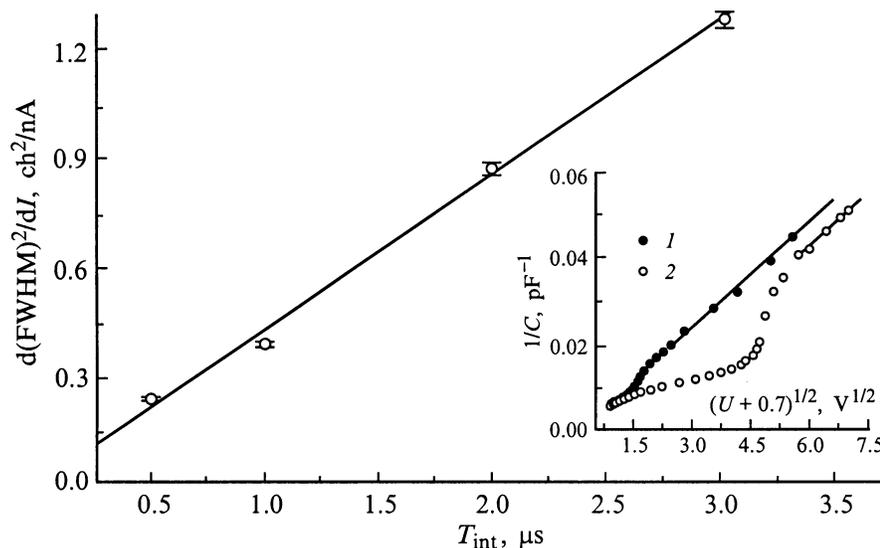
Из рис. 1 следует, что до значений  $I \approx 10$  nA ( $U \leq 200$  В) шумы темного тока практически эквивалентны шумам тока, инициированного подсветкой в условиях  $U = 50$  В. Наклон зависимости равен  $1.19 (\text{keV})^2 / (\text{nA} \cdot \mu\text{s})$  в согласии с ожидаемой величиной. Можно заключить в итоге, что уровень шума не сказывается. Однако при  $U > 200$  В возникают дополнительные шумы, скорее всего, из-за локальных пробоев  $p^+-n$ -перехода.

На фрагменте рис. 1 прослежено совпадение шумов фототока в широком диапазоне (до  $10^3$  nA) для двух напряжений:  $U_1 = 50$  В и "предпробойного" значения  $U_2 = 190$  В. Значение наклона в этом случае (1.04) оказалось несколько меньше расчетного.

На рис. 2 приведен ход шума с подсветкой другого образца, для которого значение  $U_2 = 90$  В уже соответствовало участку резкого роста шума темного тока. Показательно, что обозначенные прямые идут параллельно. Сохранение значения производной  $d(\text{FWHM})^2/dI$  важно в нескольких отношениях. Во-первых, шумы  $I_d$  и  $I_{ph}$  складываются аддитивно, не влияя друг на друга. Это означает, что шумы связаны не с протеканием тока, а с величиной напряжения. Далее, очевидно, что плотность  $I_{ph}$  (на тех участках  $p^+-n$ -перехода,



**Рис. 2.** Зависимость шума от фототока при наличии избыточных шумов темнового тока (детектор  $N2$ ). Напряжение  $V$ : 1 — 50, 2 — 90. Наблюдается постоянство величины  $d(FWHM)^2/dI$ .



**Рис. 3.** Построение производной шума по току в функции  $T_{int}$ , выявляющее отсутствие фликер-шума (детектор  $N2$ ). Негативные условия: присутствие в защитном окисле дополнительного встроенного заряда; выбор напряжения в начале участка резкого роста темнового тока. На вставке — хор емкости детектора от напряжения смещения: 1, 2 — до и после внесения в окисел заряда соответственно.

для которых  $U_2 = 90\text{ V}$  уже критично) существенно меньше плотности компоненты  $I_d$ , вызывающей избыточный шум. Другими словами, за избыточный шум ответственны весьма малые участки от общей площади детектора. Наконец, совпадение  $d(FWHM)^2/dI$  с расчетной величиной говорит о малости фликер-шума. Последнее

важно с практической стороны, так как указывает на совершенство периферии  $p^+ - n$ -перехода.

С целью дополнительной проверки качества периферии в защитный окисел был внесен дополнительный заряд. Для этого детектор был облучен дозой рентгеновского излучения с энергией  $12\text{ keV}$ . Экспозиция

Значения производной  $d(FWHM)^2/dI$  в каналах анализатора [ $ch^2/nA$ ] до и после облучения образца дозой рентгеновского излучения

$T_{int}, \mu s$	Исходный образец		Облученный образец	
0.5	0.81	0.85	0.82	0.83
1.0	1.68	1.70	1.54	1.55
2.0	3.47	3.56	3.49	3.42
3.0	5.10	5.08	5.10	5.02

Примечание. Напряжение смещения для второй и четвертой колонок 50 V, третьей и пятой колонок — 90 V.

составила 60 min при наведенном рентгеном токе детектора 0.33  $\mu A$ . Доза привела к существенному изменению вольт-фарадной зависимости (вставка на рис. 3). Оценка показала, что встроенный в окисел заряд возрос на порядок величины. Однако внесение заряда не сказалось на значениях  $d(FWHM)^2/dI$ , определенных для большей достоверности при различных  $T_{int}$  (см. таблицу).

Измерения такого рода позволяют провести следующее построение. Из формулы (2) следует, что зависимость  $d\overline{q_n^2}/dI = f(T_{int})$  при отсутствии фликер-шума должна следовать из начала координат. Это было проверено при намеренном увеличении смещения до предпробойного для образца значения  $U = 180 V$ . Данные рис. 3, где отложена по оси ординат величина  $d(FWHM)^2/dI$ , подтверждают ожидаемый ход. Точки ложатся на прямую  $y = 0.002 + 0.43 \cdot T_{int}$ . Наклон зависимости в единицах энергии равен  $1.10 (keV)^2/nA \cdot \mu s$ , что близко к приводимому расчетному значению  $1.16 (keV)^2/nA \cdot \mu s$ .

В заключение нам хотелось подчеркнуть продуктивность методики измерения шума в изложенном варианте, когда варьируется величина протекающего тока. Выбор в качестве параметра тока более физичен, чем, скажем, емкости, поскольку позволяет полнее установить характер шума. Для исследованных детекторов, кроме того, прослежено практическое отсутствие фликер-шума. Последнее указывает на хорошо выполненную защиту периферии  $p^+-n$ -перехода.

Авторы выражают благодарность М.Е. Бойко за раздел работы, связанный с облучением образцов.

## Список литературы

- [1] *Вандер Зил А.* Шум: источники, описание, измерение. М.: Сов. радио, 1973. 225 с.
- [2] *Gillespie A.B.* Signal, Noise and Resolution in Nuclear Counter Amplifiers. London: Pergamon Press Ltd., 1953. P. 155.
- [3] *Tsukuda M.* // Nucl. Instr. Meth. 1961. Vol. 14. N 3. P. 241–251.
- [4] *Вербицкая Е.М., Еремин В.К., Маляренко А.М.* и др. // ФТП. 1993. Т. 27. Вып. 11–12. С. 2052–2067.
- [5] *Eremin V., Ilyashenko I., Malyarenko A.* et al. Electrochem. Soc. Ser. High Purity Silicon IV / Ed. C.L. Claeys. Pennington, 1996. Vol. 96-13. P. 395–406.